On-Site 토양생태 독성평가 기법 연구동향 Research Trend for On-Site Soil Ecotoxicity Evaluation Methods for Field Soil

김도경 · 김신웅 · 안윤주[†]
Dokyung Kim · Shin Woong Kim · Youn-Joo An[†]

건국대학교 환경보건과학과
Department of Environmental Health Science, Konkuk University

(Received November 16, 2018; Revised January 22, 2019; Accepted January 22, 2019)

Abstract : Soil ecosystems are highly vulnerable to contamination by pollutants generated by various human activities. However, soil is the medium on which the majority of agricultural activities are based, and consequently it is necessary to conduct soil ecotoxicity and risk assessments for field soils. Nevertheless, in the case of ecotoxicity assessment for on-site soil, it is difficult to directly evaluate the ecotoxicity of field soil, and thus such assessments are generally conducted under controlled conditions after pre-treatment in the laboratory. Accordingly, it would be highly desirable to evaluate the ecotoxicity of field soil. The purpose of this study was to classify soil ecotoxicity evaluation methods for on-site soil assessments; to survey foreign reports, domestic patents, international standards, and academic research; and to propose future directions for on-site ecological toxicity assessments for field soil. On the basis of our survey, we found the following relevant sources: seven foreign reports, two domestic patents, six international standards, and seven academic researchers. However, no single method has been used consistently in other studies and the ecotoxicity of soil in the field has not been actively evaluated. Therefore, in this study, we propose suitable directions for on-site soil ecotoxicity evaluation methods by considering the speed, efficiency, sensitivity and applicability of the methods.

Key Words : Soil Ecosystem, Soil Ecotoxicity Assessment, On Site, Field Soil

요약 : 토양생태계는 인간의 다양한 활동으로 인하여 오염물질에 의한 오염 가능성이 높으며, 농업활동 등의 토지이용이 실질적으로 이루어지는 매체이므로 현장 토양에 대한 생태 독성 및 위해성 평가가 필요하다. 현재 진행되는 현장 토양에 대한 생태 독성 평가의 경우 현장 토양을 채취하여 실험실 내에서 전처리 과정 등을 거친 뒤 실험실에서 제어되는 조건에서 진행되기 때문에 실질적인 현장 토양의 생태독성평가가 이루어진다고 보기는 어렵다. 따라서 현장 내에서 즉시 이루어질 수 있는 현장용 토양생태독성평가가 필요하다. 본 연구는 현장용 토양생태독성평가 기법에 대하여 국외 보고서, 국내 특허, 국제 표준안, 그리고 학술연구를 조사하고 조사된 문헌을 대상으로 분석을 통하여 추후에 이루어질 현장용 토양생태독성평가 기법 연구에 대하여 방향성을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 조사결과 국내 보고서 1건, 국외 보고서 7건, 국내 특허 2건, 국제 표준안 6건, 그리고 학술연구 7건이 확인되었다. 그러나 개발된 기법의 경우 이외 연구에서 지속적으로 사용되지 못하고 있고 현장 내 토양생태독성평가 또한 활발히 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존 개발된 기법에 대한 분석을 통하여 앞으로 진행될 현장용 토양생태독성평가 기법에 대한 연구에 있어 신속성, 효율성, 민감성 그리고 적용가능성 등을 고려한 연구의 방향성을 제시하였다.

주제어 : 토양 생태계, 토양생태독성평가, 현장평가, 현장토양

1. 서론

오염물질은 다양한 환경매체를 통해 직·간접적으로 인체 및 생태계에 노출됨으로써 지속적인 위해성 문제를 유발시킨다. 특히 토양매체의 경우 오염물질의 정화에 막대한 시간과 비용이 소요되는 특성을 지니고 있어 합리적이고 효율적인 토양관리가 필요하다.¹⁾ 토양생태계의 경우 다양한 경로를 통해 오염물질이 유입될 수 있으며, 농업활동 등의 토지이용도가 높기 때문에, 오염된 현장 토양에 대한 적절한 평가와 관리가 있어야 한다.²⁾ 기존에는 오염토양에 대한 조사를 위해 개별 오염물질의 함량 등을 측정하여 오염 정도를 평가하였다. 이러한 분석 화학적 방법은 오염물질의 농도 및 거동을 이해하는 데에는 효과적인 반면, 다양한 오염물질이 복합적으로 존재하는 토양 내에서 생물체에 대

한 영향 정보를 제공하지 못하는 한계점을 가진다.³⁾ 현재 미국, 유럽 등 선진국에서는 토양오염의 위해성을 판단하고 토지 용도를 극대화시키기 위하여 국제 표준시험법을 통한 생태독성평가를 수행하고 있으며, 국내에서도 국내 실정에 맞는 표준시험법을 제정하고 있다.⁴⁾ 이와 같은 표준 시험법은 일부 시험법을 제외하고 대부분 실험실 규모에서 수행되도록 설계되었다.

토양은 매우 복잡하고 토양의 다양한 특성 간 상호 연관성이 높은 매체이다.⁵⁾ 이러한 토양의 특성들은 토양의 기능과 밀접한 연관성을 보이며, 오염물질 유입에 의한 다양한 특성 변화와 상호 연관성을 고려하여 보정할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 예를 들어, 토양의 주요 오염물질인 중금속의 경우는 유기물함량, pH, 그리고 점토함량 등에 따라 생물이용성이 변화하며, 수용체에 대한 독성 또한 변

[†] Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2201-6295

화한다. 기존의 토양 생태독성평가는 현장 토양을 채취하여 실험실 내에서 수용체에 대한 영향을 평가하고 있으며, 이는 토양 특성 및 기능, 기후, 지형 등의 현장 조건을 재현하기 어렵다는 제한점이 존재한다. 국제표준화기구인 International Organization of Standardization (ISO)에서는 2017년 “Soil quality - Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)⁶⁾”를 통하여 토양질 평가를 위한 TRIAD 접근법을 발표함으로써 현장적용의 중요성을 강조한 바 있다. 그러나 TRIAD 접근법은 절차와 수행 가능한 실험 목록을 제시하였을 뿐 현장 적용 가능한 토양생태독성기법을 제시하고 있지 않다. 이 외에도 현장 토양을 대상으로 현장 내에서 토양 독성을 평가하는 표준 기법 등은 미비한 실정이다.⁷⁾

본 연구에서는 현재까지 수행된 현장 내 토양생태독성평가 기법에 대한 국가 보고서, 특허, 학술연구 등을 조사하고 목록화하였다. 이를 바탕으로 현장 내 토양생태독성평가 기법이 충족시켜야 하는 요건에 대하여 기술하고 향후 요구되는 현장용 토양생태독성평가 기법의 방향성을 제시하고자 하였다.

2. 현장용 토양생태 독성평가의 동향

2.1. 주요 국가별 현장용 토양생태 독성평가 동향

본 연구에서는 주요 국가별 현장용 토양생태 독성평가 동향을 평가하기 위해서, 국내·외 정부보고서를 조사하여 검토하였다. 국내에서는 환경부 “물리·화학적 공정을 이용한 중금속오염 정화토의 토양건강성 평가기술 개발⁸⁾”에서 다양한 접근방법으로 현장용 생태독성평가를 수행한 것으로 나타났고, 미국, 호주 등의 선진국에서도 현장 토양에 대한 토양생태 독성평가에 대한 지침을 국외보고서를 통하여 제시하였다. 조사 결과, 미국, 캐나다, 호주, 그리고 유럽에서 각각 2, 3, 1, 그리고 1건의 정부보고가 제시된 것이 확인되었다(Table 1).

2.1.1. 국내

환경부 “물리·화학적 공정을 이용한 중금속오염 정화토의

토양건강성 평가기술 개발⁸⁾” 보고서에서는 국내형 토양건강성 평가기법(KoRean soil-health aSessment and Management System, KRISMAS)을 확립하고 중금속 오염토, 정화토, 그리고 개량토를 대상으로 하여 토양의 건강성을 평가하고자 하였다. 총 7단계로 토양건강성 평가체계를 분류하여 최종적으로 토양건강성지수를 산출하였고 토양의 기능을 평가하기 위하여 토양의 생산성, 안정성, 생물 다양성, 안전성을 설정하여 각 인자에 해당하는 지표를 통하여 토양건강성 지수를 산출하였다. 또한 기 개발된 기법의 적합성을 판단하기 위하여, 다양한 작물, 토양조류, 그리고 지렁이를 이용한 현장실증연구를 수행하였다.

2.1.2. 미국

미국 환경보호국(United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서 발간한 “Ecological Assessment of Hazardous Waste Sites: A Field and Laboratory Reference⁹⁾” 보고서에서는 유해 폐기물 지역에서의 토양 및 수생태계 독성 및 위해성 평가 방법에 대하여 자세한 정보를 제공하고 있다. 현장에서의 생물종 분류에 따라 평가방안을 달리하고 있었으며, 개체 군집의 밀도, 종 다양성, 식물의 광합성능, 곤충의 행동 및 생리학적 신호 등을 독성 종말점으로 제시하였다. 본 보고서의 경우 현장 내에서의 토양 독성 평가가 아닌 현장 내 존재하는 생물종의 다양성을 확인하거나 현장에 서식하는 생물을 채취 및 채집하여 관찰하는 것을 제시하였다. “Toxicity testing of soils contaminated with gasoline, diesel, and heavy oil¹⁰⁾” 보고서는 유류오염지역에 대하여 토양 생태독성 평가를 진행한 보고서이다. 유류오염지역 토양의 특성은 고려하기 위하여, 현장분석항목인 pH, 중금속농도, 탄화수소 비중, 토양특성, 그리고 입도, 실험실 분석항목인 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC), 고형(solid), 총디젤함량, 총가솔린함량, 추출 가능한 석유탄화수소(Extractable Petroleum Hydrocarbons, EPH), 그리고 휘발성 석유탄화수소(Volatile Petroleum Hydrocarbons, VPH)를 분류하여 분석하였다. 또한 토양을 채취하여 실험실에서 상추(*Lactuca sativa*)와 지렁이(*Eisenia fetida*)를 이용하여 급성 및 만성독성평가를 진행하였다. 상추는 발아율, 생존율 및 생존개체의 습중량과 건중량을 측정하였고 지렁이의 경

Table 1. Reports of foreign countries for on-site soil ecotoxicity test

Country	Report	Managing department (Year)
Unite States	• Ecological Assessment of Hazardous Waste Sites: A Field and Laboratory Reference ⁹⁾	USEPA (1991)
	• Toxicity testing of soils contaminated with gasoline, diesel, and heavy oil ¹⁰⁾	USEPA (2016)
Canada	• Evaluation of a Soil Quality Test Kit for Alberta ¹¹⁾	AAFRD (2003)
	• Biological test method: Test for measuring emergence and growth of terrestrial plants exposed to contaminants in soil ¹²⁾	Environment Canada (2005)
	• Biological test method: Test for measuring survival and reproduction of springtails exposed to contaminants in soil ¹³⁾	Environment Canada (2014)
Australia	• Tools and Systems for assessing soil health ¹⁴⁾	Department of Primary Industries (2009)
Netherlands	• Revised proposal for the risk assessment of persistence of plant protection products in soil ¹⁵⁾	RIVM (2008)

우 생존율, burrowing 등 이상현상을 측정하였으며 지렁이 만성독성평가에서는 생존율, 중량, 이상현상, 축적량 등을 측정하였다.

2.1.3. 캐나다

캐나다의 경우 미국에서 개발한 “USDA-ARS (United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service) Soil Kit¹¹⁾”를 이용하여 현장에서 토양 물리, 화학, 생물학적 특성 측정을 시도하였다.¹²⁾ 토양 호흡, 침투율, 부피 밀도, 저항층 깊이, 지렁이 밀도는 현장에서 측정하며, pH, EC, 질 산화, 입단안정성 및 함수율은 샘플을 채취하여 실험실에서 측정하는 것을 제시하고 있다. USDA-ARS Soil Kit의 경우 생태독성시험법이 아닌 현장 내 일정한 구역을 구획하여 구역 내의 지렁이의 수를 기록하는 지렁이 풍부도를 확인하는 방법을 제시하였다. 또한 “Biological test method: Test for measuring emergence and growth of terrestrial plants exposed to contaminants in soil¹²⁾” 보고서는 현장 내에서 다양한 식물을 이용하여 토양 독성평가를 진행하는 방법을 제시하고 있다. 보고서에 따르면 식물 실험의 경우, 현장 토양을 채취하여 실험실 내에서 실험하는 방법을 제시하며 현장 토양에 식물을 노출하여 총길이, 줄기와 뿌리 길이, 건 중량, 발아율, 그리고 이상 현상 등을 측정할 것을 권고하고 있다. “Biological test method: Test for measuring survival and reproduction of springtails exposed to contaminants in soil¹³⁾” 보고서는 *Folsomia candida*, *Orthonychiurus folsomi*, *Folsomia fimetaria*, *Proisotoma minuta* 4종의 톡토기류를 이용한 독성평가 방법을 제시하였다. 본 보고서의 경우 현장 내에서 직접 실험하는 방법이 아닌 현장토양을 채취하여 실험실에서 실험을 진행하는 것을 기술하고 있으며 현장 토양 채집 후에는 6주안에 실험을 진행하도록 권장하고 있다.

2.1.4. 호주

호주에서는 “Tools and Systems for assessing soil health¹⁴⁾” 보고서를 통하여 토양의 건강성을 평가하기 위한 도구 및 진행방법 등에 대하여 자세히 기술하였다. 보고서는 토양 내 수분, 토양 화학, 토양 비옥도, 토양 내 탄소 모델링 등을 통하여 토양 건강성을 평가하는 방법을 기술하였으며 특히 토양의 생물학적 특성을 이용하여 토양 건강성을 평가하는 방법에 대하여 자세히 기술하였다. 캐나다와 마찬가지로 USDA soil quality test kit를 이용하는 방법을 제시하였으며 이를 토대로 식물 성장과 관련된 토양 건강성을 정량적으로 평가할 수 있도록 개발, 보완된 Healthy Soils for Sustainable Farms soil health test kit를 제시하였다. 또한 현장 내에서 토양의 건강성을 평가할 수 있는 16가지의 방법을 제시하였다. 16가지의 방법은 새로운 독성측정 기법이 아닌 기존의 독성측정 방법 및 종 풍부도 등을 포함하고 있다. 이 중 미생물 등의 활성을 확인하는 방법이 14가지로 확인되며 지렁이의 풍부도를 평가하는 방안이 2가지로 분류되어 있다.

2.1.5. 유럽

네덜란드는 “Revised proposal for the risk assessment of persistence of plant protection products in soil¹⁵⁾”을 통해 plant protection products 등에 의한 오염으로부터 농경지 및 토양 생태계 보호를 위하여 토양 생태독성 평가체계를 제안하였다. 토양의 물리, 화학적 특성을 평가하는 방법 등이 주를 이루었으며, 농경지 및 토양 내에서 필요한 생태독성 평가 항목을 제시하였다. 특히 물질의 분해 능력에 따라 생태 독성 시험에서 노출량을 산정하는 방법에 대하여 설명하고 있으며, 분해 속도 및 노출 농도에 따른 적절한 생태독성 종 말점을 제시한다. 현장 내 생태독성 시험에 대하여 지렁이 시험, 토양 미생물 시험, 토양 균류 시험, 톡토기 시험, 식물 시험, litter bag 시험 등을 제안하고 있다. 지렁이 시험의 경우 현장 토양을 대상으로 하여 현장에서 서식하는 지렁이를 이용하도록 권고하고 있으며, 노출기간은 평가대상 독성 물질 특성에 따라 시험자가 자율적으로 선정하도록 제시하고 있으나 평균적으로 1년 동안의 노출을 권장한다. 시험종 말점으로는 지렁이의 풍부도, 생물량, 지렁이의 연령 등을 측정하도록 한다. 토양 미생물 시험과 토양 균류 시험, 톡토기 시험 그리고 식물 시험의 경우 시험에 대한 가이드라인을 제시하지 않고 있으며 실험실 내에서 진행할 수 있는 시험 방법을 기술하였다. 또한 Litter bag 시험의 경우 기존 연구로 제시된 시험방법을 이용하는 것을 권고하고 있다.

2.2. 현장용 토양생태 독성평가 동향

2.2.1. 국내 표준화 동향

국내 표준화동향은 특허정보검색서비스를 통해서 조사되었다. 일부 생물종에 대해 비교적 신속하게 독성을 평가할 수 있도록 개발된 특허 2건을 제외하고는 생물을 이용한 생태독성 기법에 대한 특허는 매우 제한적인 것으로 조사되었다. “곤충면역생리지표를 이용한 환경오염 평가방법¹⁶⁾”의 경우 곤충이 오염물질에 노출될 경우 나타나는 스트레스 신호와 위험 신호 등을 포함하는 생물체의 물질 반응 체계를 주요 종말점으로 제시하여 소낭형성 지표, 혈구세포자 연치사(apoptosis), 그리고 페놀옥시다아제 효소활성평가를 통하여 난분해성 생체 축적형 독성화합물의 영향을 평가하였다. “장님마디톡토기(*Folsomia candida*)의 도약능을 이용한 토양생태독성 측정방법¹⁷⁾”의 경우 증금속에 오염된 토양 내에 장님마디톡토기를 노출시킨 후, 화학적 스트레스를 유발하여 도약을 유도, 도약의 빈도수가 감소한 정도를 파악하여 토양의 오염도를 평가하는 기법을 제시하였다. 장님마디톡토기의 도약 기작은 포식자로부터의 도피 및 극단적인 물리적 스트레스와 관련이 있기 때문에 이를 이용하여 오염토양에서 현장 생태 독성을 평가할 수 있다.

2.2.2. 해외 표준화 동향

실험실 및 현장에서 적용 가능한 토양 생태독성 기법을 제시한 공인된 실험 가이드라인은 다음과 같으며, 미국재료 시험협회(American Society of Testing Materials, ASTM),

ISO, 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD), USEPA 등 국제기구 및 국외 정부기관의 표준시험법을 중점적으로 조사하였다. ISO의 경우 토양의 건강성과 관련된 표준시험법이 주를 이루었으며, OECD 및 USEPA, ASTM의 경우 토양 시험종을 이용한 생태독성 평가기법을 제시하는 표준시험법이 조사되었다. 다수의 표준시험법이 제시되어 있으나 현장에서 평가할 수 있도록 제시한 표준시험법은 ISO와 USEPA에서 제시한 6건에 불과한 것으로 확인되었다.

USEPA에서 발표한 “OCSP 850.2500: Field Testing for Terrestrial Wildlife¹⁸⁾”의 경우 오염된 지역에서 야생동물에 대한 살충제 등의 위해성평가를 진행하기 위한 권고사항을 제시하였다. 현장 평가 시 고려해야 하는 화학적 거동, 종밀도, 그리고 종 다양성 등의 필수요소를 소개하고, 현장 조사 및 평가 등의 절차를 제시하고 있다. 또한 현장 내의 기후, 지형 등의 환경 요인을 정립하는 방법에 대한 설명을 제시하였다. 또한, “OCSP 850.4300: Terrestrial Plants Field Study¹⁹⁾”에서는 육상 식물에 대한 현장 연구 설계의 개요를 제시하였다. 현장토양의 토성(texture), pH, 온도, 그리고 분배계수(partition coefficient) 등의 특성을 분석하여야 하며 시험목적에 따라 시험기간 및 시험종을 선택하여 진행하는 것을 제시한다. 또한, 시험기간 동안 환경조건(온도, 습도, 광도, 강수량 등)을 지속적으로 측정할 것을 권장한다. 육상 식물에 대한 현장 연구의 종말점으로는 발아율, 길이, 성장단계, 씨앗 또는 열매수, 건중량, 후세대 발아율, 독성영향, 분포도, 그리고 풍부도 등을 제시한다.

ISO에서는 “Soil quality-Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour-Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*)²⁰⁾”와 “Soil quality-Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour-Part 2: Test with collembolans (*Folsomia candida*)²¹⁾”를 통하여 현장토양을 대상으로 토양의 질 또는 독성을 평가하는 표준시험법을 제시하였다. 이는 오염물질에 대한 수용체의 회피능을 독성종말점으로 선정한 것으로, 현장 토양을 채취하여 실험실 규모에서 실험하는 방법에 대하여 기술하였다. 한편, 현장 내에서의 생태위해성 평가를 위한 국제표준인 “Soil quality

- Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)⁶⁾”이 2017년에 공식 발표되었다. 본 표준시험법에서 제시하는 “soil quality TRIAD approach”는 5단계로 분류되며, 1단계에서 토양 관리, 미래의 토지이용도를 포함한 지역정부의 토양 계획, 오염원, 생태 수용체, 노출경로 등의 가용 정보를 바탕으로 오염지역에 대한 TRIAD 수행 여부를 평가한다. 2단계에서 평가지역의 생태학적 조건을 바탕으로 오염지역에 대한 조사 계획을 수립하며, 3단계에서는 경제성, 생태학적 관점, 그리고 자원 등을 고려하여 Tier (I-III) 순으로 평가지역의 오염물질 생물이용성, 생태 모니터링, 그리고 현장조사 등을 수행한다. 4단계의 경우 오염지역에 대한 TRIAD 수행 결과를 이용하여 불확실성평가와 가중치 적용을 통해 자료를 통합하는 단계이며, 5단계에서는 이를 바탕으로 오염지역에 대한 관리 방향성(저감 대책, 정화 조치 등)을 제시한다.

2.3. 현장용 토양생태 독성평가의 학술연구 동향

현장용 토양생태 독성평가 기술에 대한 학술 연구의 경우 토양생태 독성평가 기술 중 현장에서 생물상 수용체를 직접 적용한 연구를 중점으로 조사되었다. 그 결과, 현장 토양을 대상으로 현장 내에서 토양생태 독성평가를 진행한 연구는 단지 6건으로 확인되었고, 지렁이, 톱토기, 그리고 토양조류를 이용한 연구가 각각 2, 3, 그리고 1건으로 확인되었다(Table 2).

지렁이는 토양에 오염물질이 존재할 경우 회피하는 경향이 있으며,^{7,20,22)} 이와 같은 지렁이의 특성을 이용하여 현장 토양생태독성평가 기법이 개발되었다. Natal-da-luz 등²³⁾은 두 개의 칸으로 나뉜 플라스틱 상자에 현장 토양과 대조 토양을 대상으로 붉은줄지렁이(*Eisenia andrei*)의 회피반응을 관찰하였다. Kim 등²⁴⁾은 위, 아래가 뚫린 플라스틱 튜브에 대조 토양을 담고 현장 토양에 꽂은 뒤 지렁이의 분산, 회피, 그리고 잔류반응을 계수함으로써 현장에서의 토양생태 독성평가를 진행하였다. 또한 Antunes 등⁷⁾은 플라스틱 상자에 토양과 지렁이를 함께 넣고 이를 토양 상층에 묻어 토양생태 독성평가를 진행하였으며 노출 종료 후 지렁이를 회수하여 화학적 종말점 및 중금속 축적량을 분석

Table 2. On-site soil ecotoxicity test studies on field soil

Test species	Endpoint	Exposure duration	Reference
Earthworm	<i>Eisenia andrei</i>	Biochemical marker	48 hours
	<i>Eisenia andrei</i>	Avoidance behavior	48 hours
	<i>Eisenia andrei</i>	Burrowing and avoidance behavior	24 hours
Collembola	<i>Folsomia candida</i>	Survival, Reproduction	28 or 56 days
	<i>Folsomia candida</i>	Avoidance behavior	48 hours
Soil microbe	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Chlorophyll intensity	48 hours
	Soil microbe in field	Feeding activity	-
	Soil microbe in field	Feeding activity	10 - 20 days
	Soil microbe in field	Feeding activity	10, 50, 90 days

하였다. Smit 등²⁵⁾은 10 개의 칸으로 구획된 플라스틱 큐브에 현장 토양을 넣고 장님마디톡토기(*Folsomia candida*)를 노출하고 현장 내에서 생태 독성평가를 진행한 뒤 생존율과 생식율을 측정하였다. Natal-da-luz 등²³⁾은 지렁이 회피 실험과 동일하게 토크토기 실험에서도 회피반응을 이용하여 현장 토양생태 독성평가를 수행하였다.

한편 조류에 대한 토양생태 독성시험의 경우 시험 토양에서의 토양 조류의 직접적인 추출이 어렵고 그 종을 정확하게 규명할 수 없다는 제한점이 존재한다.^{26,27)} 최근 Nam and An²⁸⁾은 페이퍼디스크를 조류의 흡수제로 사용하여 토양에 직접 적용하고 토양에 존재하는 오염물질에 노출되도록 하는 시험방법을 개발하였고, 이를 국내 중금속 오염현장에 적용한 바 있다.²⁹⁾

현장 토양에 대하여 생물 활성을 평가한 학술 연구는 3건으로 확인되었다.³⁰⁻³²⁾ 확인된 3건의 연구에서는 현장 내 서식하는 토양 생물종의 먹이섭취활동을 이용하여 생태독성평가를 수행하였다. Crossley 등³⁰⁾은 주변의 나뭇잎을 그물 가방에 모아 현장에 놓은 뒤 노출 종료 후 수거하여 줄어든 중량을 측정함으로써 소비된 유기물의 양을 산정하였고, Kratz³¹⁾은 얇은 PVC 스트립에 뚫린 구멍을 미생물이 섭취할 수 있는 먹이로 채워 노출 및 수거함으로써 소비된 먹이량을 산정하였다. Casabé 등³²⁾의 경우 이 두 가지 방법을 모두 이용하여 현장생태 독성평가를 진행하였다.

3. 현장용 토양생태독성 연구동향 분석 및 향후 연구 방향 제시

현장용 토양생태독성 기법을 제안한 보고서는 미국 2건, 캐나다 3건, 호주 1건, 네덜란드 1건으로 확인되었다. 국내 특허의 경우 2건이 보고되었고 국제표준안의 경우 6건의 가이드라인이 확인되었으며 학술연구의 경우 총 6건이 보고되었다. 6건의 국외 보고서의 경우 현장 토양에 대한 오염 평가 방법에 대하여 제시하였는데 주로 현장 내의 개체 군집의 다양성 및 건강성, 생물 기반의 활성을 평가하거나 현장 토양을 채취하여 실험실 내에서 생태독성평가를 진행하는 방법을 제시하였다. 국제표준안의 경우 또한 현장 토양을 채취하여 실험실 내에서 평가하는 기존의 독성평가 방법에 대하여 제안하거나 현장 내의 토양 건강성평가에 대한 기법을 제안하였다. 한편 학술연구의 경우 기존의 실험실 내에서 평가하는 기법을 변형하여 현장에 적용하여 토양생태 독성평가를 진행하거나 새로 개발한 토양생태 독성평가 기법을 현장에 적용한 연구들이 확인되었다.

국제표준안을 포함하여 1962년부터 최근까지 현장 내에서 직접 토양생태독성평가 기법에 대한 연구가 진행되었으나 개발된 기법들이 지속적으로 활용되지는 못하는 것으로 파악되었다. 이는 현장실험의 경우 실험실 내에서 수행하는 경우에 비하여 실험 조건 제어가 어려울 뿐 아니라, 현장에서 진행되는 토양생태독성평가의 경우 그 특성에 따라 신

속성, 효율성, 민감성, 그리고 적용가능성 등의 다양한 조건을 만족해야 하기 때문이다. 한편 여러 연구에서는 실험에 소요되는 시간이 적을수록 현장에서 제어해야 하는 요인들이 적기 때문에 실험에 대하여 오차가 발생할 확률이 적을 것으로 보고한 바 있다.^{7,33-36)}

시간 뿐 아니라 생태독성평가에 소요되는 실험 도구 및 기구, 경제적 비용, 노동력 등에 있어 효율성 또한 요구된다. 한편 실험실 규모의 토양생태독성 기술의 평균적인 민감도와 비교하였을 때 해당 기술의 평균민감도가 현저히 떨어질 경우 실험 결과를 신뢰하기 어렵다. 따라서 현장실험에서의 실험 결과가 실험실 규모의 토양생태독성 기술의 독성값 및 용량-반응관계 등과 비교하였을 때 유의하게 차이나지 않는 범위로 확인되는 것이 필요하다. 또한 현장실험일 경우 기후, 지형 등이 다양하게 존재하여 실험 조건이 상이하므로, 각 현장에 적용가능성이 용이하도록 토양생태 독성평가 기법을 개발해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 현장에서 토양생태 독성평가를 진행한 국외 과제 현황, 국내 특허 현황, 국제표준안, 그리고 학술연구에 대하여 조사, 분석하고 이를 통하여 추후 개발되어야 할 현장용 토양생태 독성평가 기법이 갖추어야 할 조건들을 제시하고자 하였다. 현재까지 진행된 현장 내 토양생태 독성평가 기법의 경우 식물, 지렁이, 토크토기, 토양조류를 포함한 토양미생물을 이용한 것을 확인하였다. 특히 학술연구의 경우 지렁이, 토크토기, 토양미생물 등을 이용하여 다양한 종류의 현장 토양생태 독성평가 기법을 개발하였다. 이와 반면 식물에 대한 학술연구는 확인된 바가 없는데 식물의 경우 현장에서 생태독성평가를 진행할 경우 1년 이상의 장기노출을 진행하며 오염물질을 토양에 적용하여 독성을 평가하거나 토양 건강성을 평가하고자 하는 연구로 확인되었기 때문이다.

현장용 토양생태독성평가 기법에 대한 연구는 다양한 생물종을 이용하여 진행되었지만 개발된 기법의 경우 계속해서 사용되어 현장 내 토양생태독성을 평가하는데 사용되지 않는다는 한계점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 새로운 기법을 개발할 때 신속성, 효율성, 민감성 그리고 적용가능성 등을 고려하여 연구를 진행하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 멀티스케일 에너지 시스템 연구단 글로벌 프린터 연구개발 사업으로 수행된 연구임(2016M3A6A79-45504).

References

- Jeong, S.-W. and An, Y.-J., "Soil Investigation Strategies for Soil Risk Assessment," *J. Soil Groundw. Environ.*, **12** (1), 36~43(2007).
- O'halloran, K., "Toxicological Considerations of Contaminants in the Terrestrial Environment for Ecological Risk Assessment," *Hum. Ecol. Risk Assess.*, **12**, 74~83(2006).
- Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Review of the Extraction Methods of Soil Extracts, Soil Elutriates, and Soil Suspensions for Ecotoxicity Assessments," *J. Soil Groundw. Environ.*, **19**(3), 15~24(2014).
- Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Investigation of Korean Native Organisms for Development of Ecotoxicity Test : (2) Soil Test Species," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(1), 48~57 (2018).
- Chea, Y., Kim, S. W., Kwak, J. I., Yoon Y., Jeong, S.-W. and An, Y.-J., "A Comparative study of Assessment Techniques for Soil Ecosystem Health: Focusing on Assessment Factors of Soil Health," *J. Soil Groundw. Environ.*, **20**(3), 15~24(2015).
- International Organization for Standardization (ISO), "ISO 19201 Soil quality - Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)," International Organization for Standardization (2005).
- Antunes, S. C., Castro, B. B., Nunes, B., Pereira, R. and Goncalves, F., "In situ bioassay with *Eisenia andrei* to assess soil toxicity in an abandoned uranium mine," *Ecotox. Environ. Safe.*, **71**, 620~631(2008).
- Ministry of Environment, "Development of soil health assessment technology for heavy metal contaminated soil after physicochemical treatments,"(2017).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Ecological Assessment of Hazardous Waste Sites: A Field and Laboratory Reference,"(1991).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Toxicity testing of soils contaminated with gasoline, diesel, and heavy oil,"(2016).
- Environment Canada, "Evaluation of a Soil Quality Test Kit for Alberta,"(2005).
- Environment Canada, "Biological test method: Test for measuring emergence and growth of terrestrial plants exposed to contaminants in soil,"(2005).
- Environment Canada, "Biological test method: Test for measuring survival and reproduction of springtails exposed to contaminants in soil,"(2014).
- Department of Primary Industries, "Tools and Systems for assessing soil health,"(2009).
- National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), "Revised proposal for the risk assessment of persistence of plant protection products in soil,"(2008).
- Kim, Y. and Ryoo, K. S., KR Patent No. 100775555. Korean Intellectual Property Office(2007).
- An, Y.-J. and Kim, S.-W., KR Patent No. 101426901. Korean Intellectual Property Office(2013).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), "OCSP 850.2500: Field Testing for Terrestrial Wildlife," (2012).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), "OCSP 850.4300: Terrestrial Plants Field Study,"(2012).
- International Organization for Standardization (ISO), "ISO 17512-1 Soil quality-Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour-Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*)".
- International Organization for Standardization (ISO), "ISO 17512-2 Soil quality-Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour-Part 2: Test with collembolans (*Folsomia candida*)".
- Hund-Rinke, K. and Wiechering, H., "Earthworm avoidance test for soil assessments: an alternative for acute and reproduction tests," *J. Soils Sediment*, **1**, 15~20(2001).
- Natal-da-Luz, T., Rombke, J. and Sousa, J. P., "Avoidance tests in site-specific risk assessment-Influence of soil properties on the avoidance response of collombola and earthworms," *Environ. Toxicol. Chem.*, **27**(5), 1112~1117(2008).
- Kim, S. W., Kim, D., Moon, J., Chae, Y., Kwak, J. I., Park, Y., Jeong, S.-W., An, Y.-J., "Earthworm dispersal assay for rapidly evaluating soil quality," *Environ. Toxicol. Chem.*, **36**(10), 2766~2772(2017).
- Smit, C. E., van Beelen, P., van Gestel, C. A. M., "Development of zinc bioavailability and toxicity for the springtail *Folsomia candida* in an experimentally contaminated field plot," *Environ. Pollut.*, **98**(1), 73~80(1997).
- International Organization for Standardization (ISO), "ISO 16387 Soil quality - Effects of contaminants on Enchytraeidae (*Enchytraeus* sp.) - Determination of effects on reproduction," (2014).
- International Organization for Standardization (ISO), "ISO 17126 Soil quality - Determination of the effects of pollutants on soil flora - Screening test for emergence of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.),"(2005).
- Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Paper-disc method: An efficient assay for evaluating metal toxicity to soil algae," *Environ. Pollut.*, **216**, 1~8(2016).
- Nam, S.-H., Moon, J., Kim, S. W., Kim, H., Jeong, S.-W., An, Y.-J., "Rapid in situ assessment for predicting soil quality using an algae-soaked disc seeding assay," *Environ. Monit. Assess.*, **189**, 637(2017).
- Crossley, D. A. and Hoglund M. P., "A Litter-Bag Method for the Study of Microarthropods Inhabiting Leaf Litter," *Ecology*, **43**(3), 571~573(1962).
- Kratz W., "The Bait-Lamina Test," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **5**(2), 94~96(1998).
- Casabé, N., Piola, L., Fuchs, J., Oneto, M. L., Pamparato, L., Basack, S., Giménez, R., Massaro, R., Papa,

- J. C. and Kesten, E., "Ecotoxicological Assessment of the Effects of Glyphosate and Chlorpyrifos in an Argentine Soya Field," *J. Soils Sediment*, **7**(4), 232~239(2007).
33. Ratliff, L. F., Ritchie, J. T. and Cassel, D. K., "Field-Measured Limits of Soil Water Availability as Related to Laboratory-Measured Properties," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**(4), 770~775(1983).
34. Entin, J. K., Robock, A., Vinnikov, K. Y., Holinger, S. E., Liu, S. and Namkhai, A., "Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics," *J. Geophys. Res-Atmos*, **105**(9), 11865~11877(2000).
35. Western, A. W., Grayson, R. B. and Blöschl, G., "Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **30**, 149~180(2002).
36. Cao, R., Jia, X., Huang, L., Zhu, Y., Wu, L. and Shao, M., "Deep soil water storage varies with vegetation type and rainfall amount in the Loess Plateau of China," *Sci. Rep.*, **8**, 12346(2018).